中俄原油管道冻土灾害问题及防控对策研究

李国玉[1,2,3] 曹亚鹏[1,2,3*] 马 巍[1,2,3] 金晓颖[4] 陈朋超[5] 俞祁浩[1,2] 张中琼[1,2,3] 穆彦虎[1,2,3] 金会军[1,3,4]

1 中国科学院西北生态环境资源研究院 冻土工程国家重点实验室 兰州 730000
2 中国科学院大学 工程科学学院 北京 100049
3 中国科学院西北生态环境资源研究院 大兴安岭冻土工程与环境观测研究站 加格达奇 165000
4 东北林业大学 土木工程学院 哈尔滨 150040
5 国家管网集团北方管道有限责任公司 廊坊 065000

摘要 中俄原油管道作为我国四大能源战略通道之一，在保障国家能源安全、优化油品供输格局、推进中蒙俄经济走廊建设和深化中俄战略合作等方面都具有十分重要的意义。针对中俄原油管道沿线冻土灾害和环境问题，文章提出了“控制融化”的冻土调控原则和成套的冻土灾害防控技术，为中俄原油管道的绿色建设和安全运营提供重要保障。研究成果可为国内外多年冻土区类似工程的建设提供参考，并将为冻土工程、管道运输等领域学科发展提供重要支撑。

关键词 中俄原油管道，冻土工程问题，融沉，控制融化

DOI 10.16418/j.issn.1000-3045.20201227101

中俄原油管道是我国四大能源战略通道之一，中国境内分两期建设；一线和二线先后于 2011 年 1 月和 2018 年 1 月正式运营，每年进口俄罗斯原油 3 000 万吨，承担我国 58% 的陆上原油进口重任。截至 2021 年 1 月 1 日，中俄原油管道累计输送原油近 2 亿吨，其对保障国家能源安全、优化油品供输格局、深化中俄战略合作和促进经济社会发展等方面都作出了重要贡献①。中俄原油管道总长 1 030 km，起自俄罗斯东西伯利亚—太平洋输油管道的斯科沃罗季诺输油站，从我国漠河兴安镇入境，自北向南沿大兴安岭东坡延伸，穿越嫩江平原，止于大庆林源输油站（图 1）。管道外径 813 mm，壁厚 11.9 mm（多年冻土

* 通讯作者
资助项目：中国科学院战略性先导科技专项（A 类）（XDA2003020102），国家自然科学基金（41672310）
修改稿收到日期：2021 年 1 月 23 日
① 中国新闻网 . 中俄原油管道开通运行 10 周年 由俄进境原油近 2 亿吨 . (2021-01-01)[2021-01-23]. https://www.chinanews.com/cj/2021/01-01/9376433.shtml.

区，管道壁厚为12.5—17.5 mm），设计压力为8 MPa（局部10 MPa），管道材质选用L450（X65）级钢材。管道敷设方式采用传统沟埋敷设方式，在多年冻土区埋深为1.6—2.0 m[1,2]，采用常温密闭输送工艺输送俄罗斯低凝原油。管道在中国境内段全长953 km，穿越漠河—加格达奇约441 km的不连续多年冻土区和加格达奇—大庆约512 km的深季节冻土区（冻深>1.5 m）。其中，在多年冻土区段，高温高含冰量冻土区为119 km，冻土沼泽湿地区为50 km[3,4]。

在中俄原油管道修建之初，多年冻土退化、严寒低温环境和脆弱生态成为管道建设的三大挑战问题。文章基于中俄原油管道多年研究经验的积累，提出创新性冻土调控原则和系统性解决方案，保障了中俄原油管道多年无间断安全运营、生态恢复良好和无污染事件发生，同时为国内外类似工程的修建、运营及维护提供参考。

1 中俄原油管道沿线多年冻土问题

中俄原油管道建设和运营过程中面临的最严重问题和威胁为多年冻土和冻土工程病害问题，即：冻土融化引发管基失稳和冻土环境退化问题。另外，管道还受到冻胀丘、冰椎和冻融滑坡等不良冻土现象的影响[3]。

气候变暖引起管道沿线多年冻土退化速率加快[5-7]。现有监测资料表明，气候变暖背景下，我国大、小兴安岭多年冻土广泛退化，和20世纪70年代相比，多年冻土面积退化了35%—37%[8-10]，而冻土退化和融沉直接影响管道的安全稳定运营。

中俄原油管道建设和运营过程中所面临的冻土问题有其本身的特殊性和复杂性，主要表现在以下4个方面。

（1）管道沿线多年冻土和生态地质环境问题突

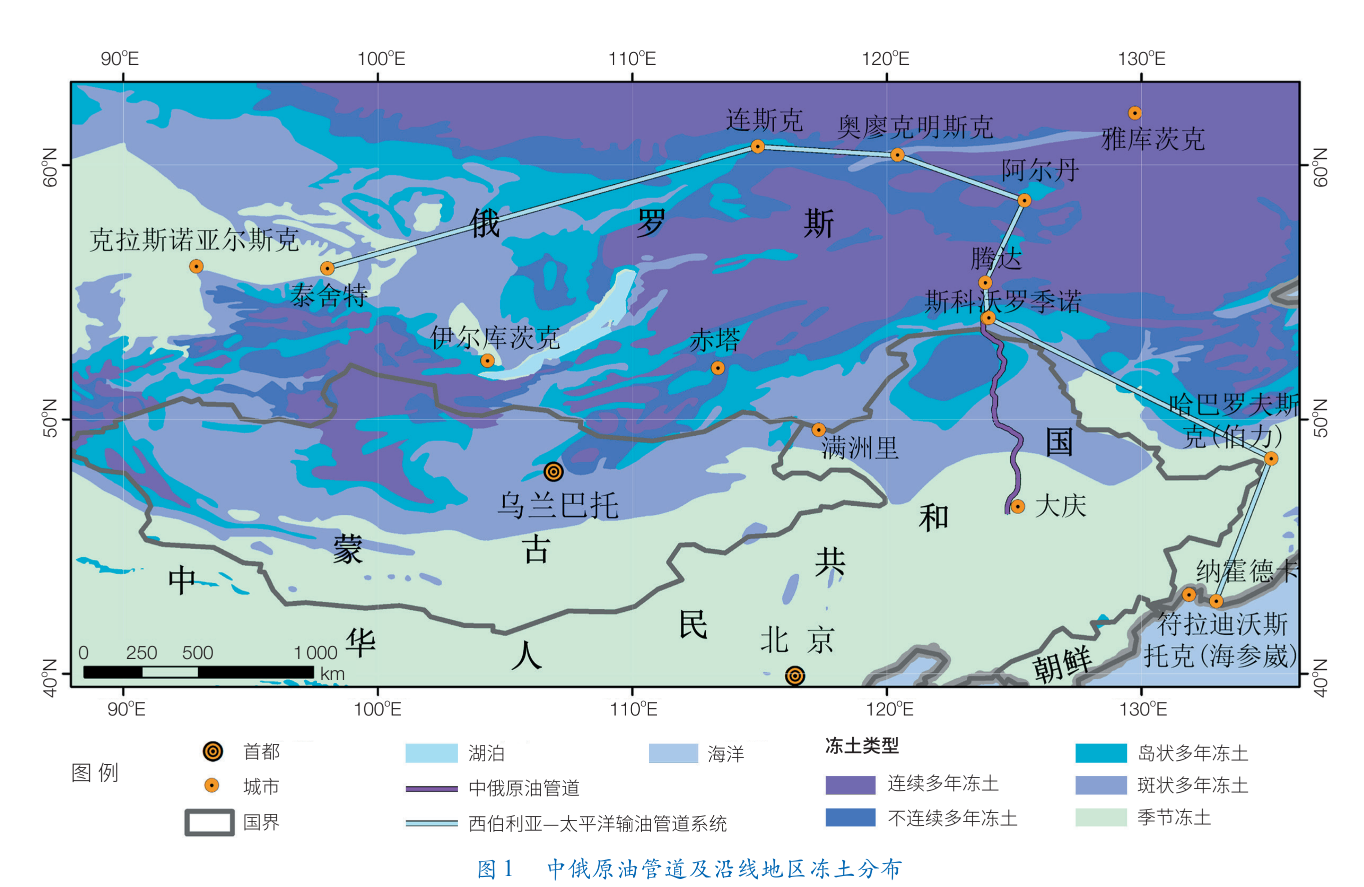


图1　中俄原油管道及沿线地区冻土分布

Figure 1　Routing of China-Russia crude oil pipeline and distribution of permafrost seasonally frozen ground near pipeline route

出。管道沿线多年冻土区位于欧亚大陆多年冻土区南界附近，其属于生态系统保护型多年冻土——兴安型多年冻土[11]。兴安型多年冻土温度高（从南向北，冻土温度为 –1.8℃—–0.7℃）、含冰量大（多年冻土上限附近，多年冻土最大体积含冰量达 80%—90%）且分布不连续（从南向北，多年冻土分布面积从 0—20% 到 60%—70%间变化）；冻土热稳定性差，对冻土赋存环境（如茂密植被、有机土盖层等）扰动（如工程活动、垦殖、火灾等）非常敏感，这使得多年冻土保护变得更为困难。此外，管道穿越北方原始森林和湿地等，多年冻土退化问题可能会引发一系列冻土生态地质环境问题。例如，会引发森林和湿地的生态服役功能退化、水土流失、环境污染和生态系统异化与退化等。因此，需重点关注管道施工和运行热扰动带来的环境管护问题。

（2）大开挖施工加速多年冻土退化。美国 Alyeska 原油管道大约有一半长度的管道采用热管桩支撑进行地上“架空敷设”，施工对冻土的热扰动小[12]。加拿大 Norman Wells 原油管道采用埋地敷设，其管径小（外径 323.9 mm）、油温低，原油自入口输送 50 km 以后管道油温基本受周围土体温度控制而相对稳定。在中俄原油管道境外段（俄罗斯斯科沃罗季诺—中国漠河连崟段）沿线的高含冰量多年冻土区，管基主要采用冻胀非敏感性土（如砂砾石）换填冻胀敏感性细粒土。考虑到防火等严酷的沿线自然环境和社会环境，我国境内段采用埋地方式铺设；管道经过大片森林（覆盖率 70%）、湿地和许多村镇，大开挖施工（深度 2.5—6 m，宽度 2—3 m）暴露多年冻土且管沟积水引起地下冰融化。因此，如何合理进行管沟开挖和管道敷设，对沿线多年冻土和北方林区与沼泽的生态环境保护是一大挑战。

（3）管道运营后高油温加速多年冻土融化。管道相当于一个内热源，全年正温运营，持续向管周冻土层放热（2018 年监测油温为 12.6℃—24.6℃）[1-4]。相比地上冻土工程，埋地管道高油温热扰动更直接且更剧烈。因此，管底多年冻土融化深度更大（2018 年管底融化深度近 10 m）[13]，这加大了管道融沉灾害和冻土环境系统破坏风险。

（4）管道沿线水文地质、工程地质和环境地质问题突出。管道沿线冬季严寒（漠河最低气温达 –52.3℃）、降雪量大（漠河多年平均降雪量为 35cm），夏季气温较高（漠河最高气温可达 35.2℃）、降雨量大（漠河多年平均降雨量为 500 mm）。管道沿线区域地下水位高，地表水和地下水丰富；沼泽广布、森林茂密，多年冻土与融区频繁过渡，且沿线冻融敏感性土（浅层细粒土和泥炭土）分布广泛，导致管道的（差异性）冻胀和融沉风险普遍较大[1-4]。

2 中俄原油管道冻土地基防控原则

中俄原油管道沿线典型地层从上到下依次为泥炭土（厚度 0.8—0.9 m）、细粒土（厚度 0.9—1.9 m）、砾砂土（厚度 1.8—4.7 m）和强（弱）风化基岩[14]。管道下部大多为砾砂层和基岩层，砾砂和基岩的融沉系数小，工程地质条件较好。同时，由于钢管的延展性较好，管道所能承受的差异性融沉变形较大。根据相关研究，管道在一定条件下最大差异性融沉变形可达 565 mm[15]。因此，为了大幅减小管道建设和运营成本，区别于青藏铁路、青藏公路和美国 Alyeska 原油管道等冻土工程采用的“冷却降温”的冻土地温调控原则，中俄原油管道提出了“控制融化”的冻土地温调控原则，即控制管周冻土发生适量融化，使管道变形在容许变形范围内，以确保管道安全稳定运行。

基于“控制融化”的冻土地温调控原则，创新研发了多种冻土融化防控新措施；利用现场示范工程、室内物理模型试验和数值仿真试验验证其工程效果并优化其设计参数，并结合传统的冻土处理技术，形成一整套中俄原油管道冻土融沉灾害防控对策。同时，

在中俄原油管道沿线建立了完整的水-热-变形长期监测系统，提供实时监测数据以保障中俄原油管道安全、稳定运营。

3 中俄原油管道冻土灾害防控对策

目前，中俄原油管道面临最严重的灾害风险为冻土融沉灾害[4]（图2），本文重点阐述了冻土融沉灾害防控和冻土环境保护。综合考虑管道沿线气候条件、冻土工程地质条件、生态环境、水文系统，以及经济效益和工程实效等因素，科学、合理地控制管道权利范围内的冻土环境和油温，研发新的冷却和散热装置，增加管基承载力，以及提高管材强度和柔韧性，形成一整套管道冻土灾害防控对策，以保障管道安全稳定运营。具体措施包含以下4个方面。

3.1 增加管道壁厚

增加管道壁厚，可以直接提高管道的强度和柔韧性，以及抗变形和抗破坏的能力。在非多年冻土区，中俄原油管道壁厚为11.9 mm；而在多年冻土区，根据不同含冰量和融沉敏感性，管道壁厚增加到12.5—17.5 mm，从而显著提高了管道抗冻胀和融沉差异性变形能力。该措施已在整个多年冻土区普遍应用。

3.2 控制油温

高油温是冻土融化的直接原因。通过调控入口油温，使得油温尽可能与管道周围土体温度一致，可直接减少管道热量向冻土层传递，以减小多年冻土的融化。例如，加拿大Norman Wells原油管道入口油温冷却至 –1℃进行输送，显著减小了管-土的热交换[16]，在一定程度上控制了管道融沉灾害。2018年夏季，中俄原油管道境内段漠河首站（兴安镇）附近油温最高达24.6℃，因此有必要采取管道入口原油冷却或管道穿越低温河流等措施降低入口油温，以减少冻土融化。

3.3 换填管基土

中俄原油管道沿线地表浅层广泛分布有冻胀敏感性土和融化不稳定多年冻土，如细颗粒含量较高的黏粉质砂土和泥炭土。当此类冻土含冰量较高时，冻土融化或回冻会发生较大的变形，对管道造成安全风险。中俄原油管道采用非冻胀敏感性土换填，提高了管基土融化后的承载力，减小了管基土融沉变形且降低了管道融沉灾害风险。该措施已在整个多年冻土区



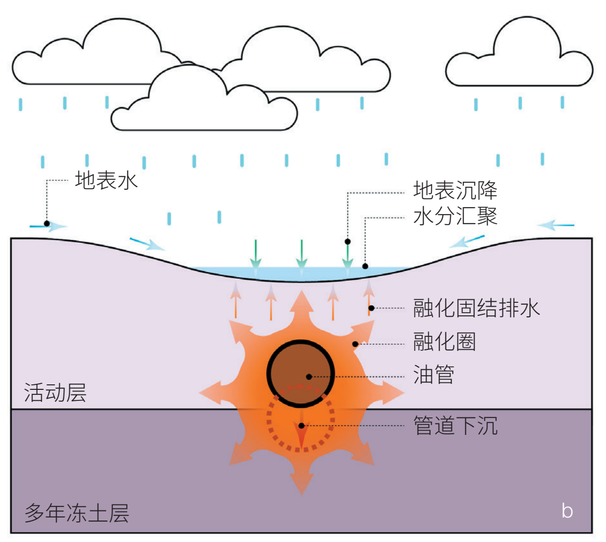


图2 中俄原油管道沿线冻土融沉灾害

Figure 2 Thaw settlement along China-Russia Crude Oil Pipeline

（a）现场灾害；（b）融沉示意图

(a) Water ponding in the right-of-way (ROW) along China-Russia Crude Oil Pipeline; (b) Schematic diagram of evolution mechanisms of thaw bulb and pipeline settlement

普遍应用。

3.4 调控冻土温度

（1）恢复地表植被。管道敷设完成后，对管堤和管道权利范围内施工扰动的地表进行植被恢复（复种）[17]，能够改变地-气界面水热交换条件，减小地表吸热，降低地表温度。例如，监测发现沼泽草甸地区比稀疏草皮地区平均地表温度低 2.4℃[18]。随着地表温度的降低，冻土融化和管道差异性融沉变形显著减少。同时，植被恢复能够全面改善受管道施工影响的生态环境。

（2）热管。一种封闭的气-液两相对流循环换热装置。在冷季，可以将自然界中“冷量”传输到冻土层中，降低冻土温度；在暖季，当热管冷凝段与蒸发段达不到启动温差时，热管停止工作，仅有少量的热量通过热传导传入到地下，在一整年内，冻土热收支为负，从而达到降温保护冻土融化的目的[19]。热管具有施工方便、降温效果好等优点，在管道建设和后期维护中被广泛采用。2019 年冷季，某一现场监测数据表明，热管措施断面在 4 m 和 3 m 深度处地温分别比无措施断面低 1℃左右和 2.5℃左右。目前，热管在中俄原油管道沿线富冰、饱冰和含土冰层区域共推广应用了 12 000 多根。

（3）纵向通风管。一种平行埋设于油管两侧的通风换热系统（图 3）。当油管周围土体温度高于通风管内空气温度时，通风管发生自然对流换热，将油管散发的热量释放到大气环境中，同时将冷空气带入到地下，降低油管周围土体温度。当油管周围土体温度低于通风管内空气温度时，通风管类似热管停止工作。当冷季风速较大时，通风管也可以通过强迫对流将大气环境中“冷量”带入到地下，减缓冻土融化。另外，油管底部保温层可以减少油管热量向底部冻土层传递，减缓冻土融化。数值仿真试验表明，纵向通风管运营 20 年后，冻土融化深度可减小约 4 m[20]。该结构适用在一些富冰、饱冰和含土冰层区及冻土生态保护区域。

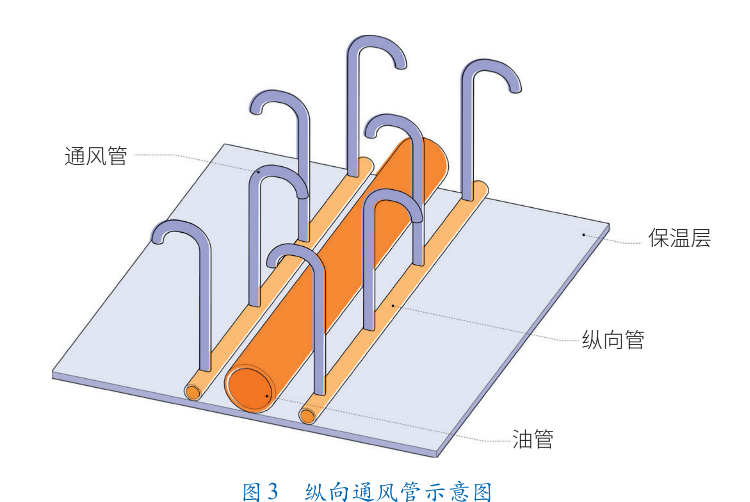


图 3 纵向通风管示意图

Figure 3 Schematic diagram of longitudinal air-ventilated pipe

（4）横向U型通风管。其降温原理和纵向通风管相似，适合于某一点或小范围的管道降温，结构如图 4 所示。在中俄原油管道某一冻土湿地区域采用了外径为 21.9 cm 的 U 型通风管，监测发现 U 型通风管在冷季具有较好的冷却效果——冷季通风管附近地表以下 4 m 地温比无通风管附近地温低 0.5℃左右[14]。该措施适用于管道沿线富冰、饱冰和含土冰层区域。

（5）横向 W 型通风管。一种利用对流换热及风机抽吸联合作用换热的装置，主要由左右进风管、中部排风管和无动力风机组成，呈 W 型（图 5）。在冷

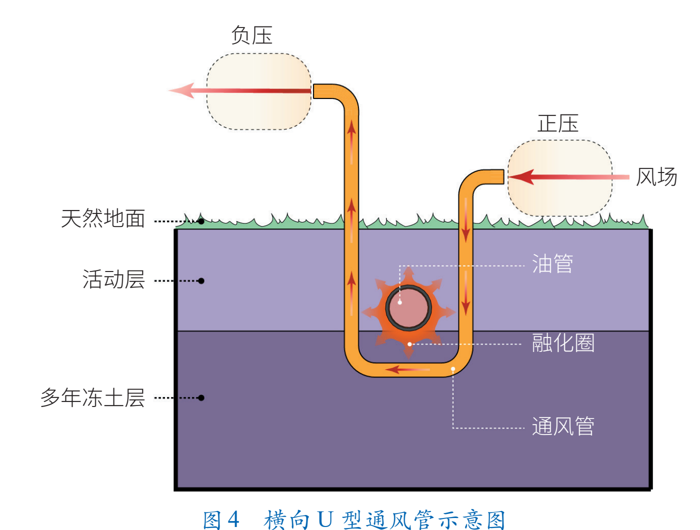


图 4 横向 U 型通风管示意图

Figure 4 Schematic diagram of horizontal U-shaped air-ventilated pipe

季无风时，油管温度高于中部排风管内空气温度，排风管内空气在油管加热作用下上浮，发生自然对流换热，驱动无动力风机旋转，抽吸通风管内空气流动，加速对流换热；在冷季有风时，自然风场带动无动力风机旋转，抽吸排风管内空气，加速管内空气流动，从而将油管散发的热量快速释放到大气环境中，同时也将大气环境中“冷量”传入到管道周围土体中，减缓冻土融化。在暖季，风速较小且气温较高，W 型通风管类似于横向 U 型通风管停止工作。室内大型模型试验结果发现，6 个冻融循环后，无措施管底和 W 型通风管管底 25 cm 处温度分别为 2.4℃ 和 0.4℃ 左右，W 型通风管具有一定冷却作用。该措施适用于管道沿线饱冰和含土冰层区域。

（6）管道保温。一种经济合理和效果明显的措施，可直接、显著减少管道与冻土层间热量交换，减缓冻土融化。在中俄原油管道沿线多年冻土区段，管道周围几乎都铺设了 8 cm 厚的保温材料（硬质聚氨酯泡沫塑料），该措施显著减小了冻土的融化范围和速率。数值仿真试验研究发现，铺设 8 cm 厚保温材料的管道周围冻土在 50 年后融化深度是无保温层管道的一半，这说明保温层起到了明显的隔热效果。在饱冰及含土冰层等区段，保温层与其他措施相结合组成复合措施，如保温 + 换填、保温 + 增加壁厚、保温 + 热管、保温 +U 型横向通风管、保温 + 换填 + 增加壁厚等，冻土融化防控效果更好。

（7）通风冷垫系统。一种利用通风管散热和冷媒相变潜热储能相结合的装置（图 6），既能控制融沉又能避免冻胀[21]，主要由左右对流换热通道、制冷箱体和蓄能体等 3 个部分组成。该结构在冷季换热机理和通风管相似，只是在冷季降温时，当蓄能体在温度低于相变温度时蓄能体发生相变并放热，阻止箱内温度进一步降低，从而调控管道周围冻土温度过低引发冻胀现象。在暖季，通风管停止工作，仅少量热量通过热传导进入地下制冷箱和冻土层，使其温度缓慢升高，如果有较多的热量进入该系统，蓄能体温度在高于或接近其相变温度时，蓄能体首先发生相变并吸热，减缓箱体底部冻土融化。数值仿真试验研究发现，通风冷垫系统具有较好的冻土融化调控效果，目前正在现场进行实体工程效果验证。该措施适用于管道沿线富冰、饱冰和含土冰层区段冻融防控。

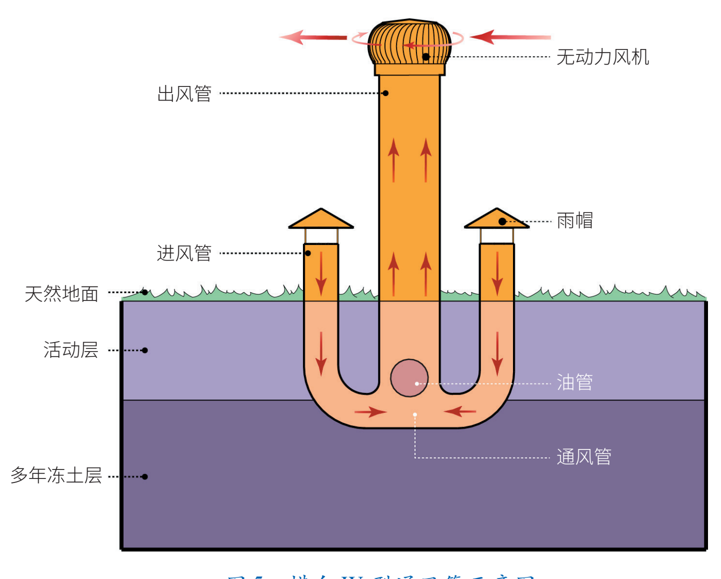


图 5　横向 W 型通风管示意图

Figure 5　Schematic diagram of horizontal W-shaped air-ventilated pipe

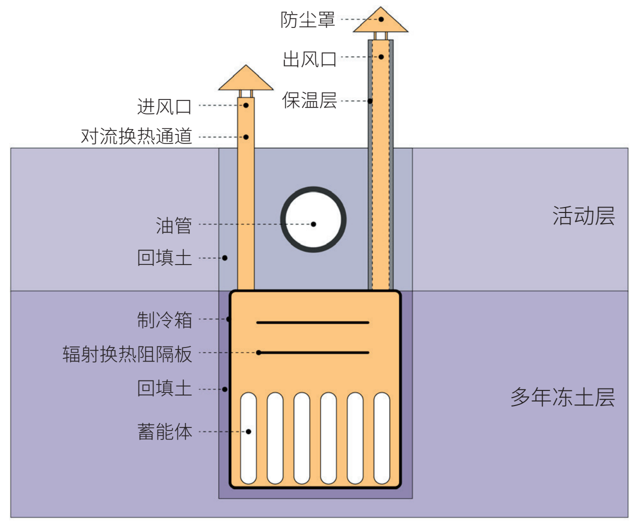


图 6　通风冷垫系统示意图

Figure 6　Schematic diagram of air-ventilated and energy storage system

（8）块碎石管堤。一种地上管道敷设结构（图7）。该结构可避免管沟开挖和冻土扰动，同时可以避免森林火灾对管道的影响。管道铺设在块碎石层上部冻胀融沉非敏感性粗颗粒土层中，避免了季节性的冻胀和融沉。块碎石层可以散发油管热量，也可以降低管堤下部土体温度。室内大型模型试验研究发现[22]，6个冻融循环后，块碎石管堤底部冻土最大融深仅为传统埋地式管道的17%，说明该措施控制管底冻土融化效果较好。该措施适用于管道沿线富冰、饱冰和含土冰层包括冻土湿地等区段。

4 展望

文章基于多年研究经验积累提出的中俄原油管道冻土地温调控原则和冻土灾害成套防控对策，保障了管道多年不间断安全运营、生态恢复良好和无污染事件发生。但是，中俄原油管道冻土灾害防控和冻土环境保护仍需不断完善和发展，未来还需重点关注以下4个方面内容。

（1）完善管道沿线冻土灾害长期监测系统。补充重点冻土灾害区域监测设备和监测要素，完善和升级破坏或失效的监测系统，确保管道沿线监测系统正常运行和数据连续完整获取。增加管道应力应变测量，完善冻土-管道水、热、力变形全要素监测。

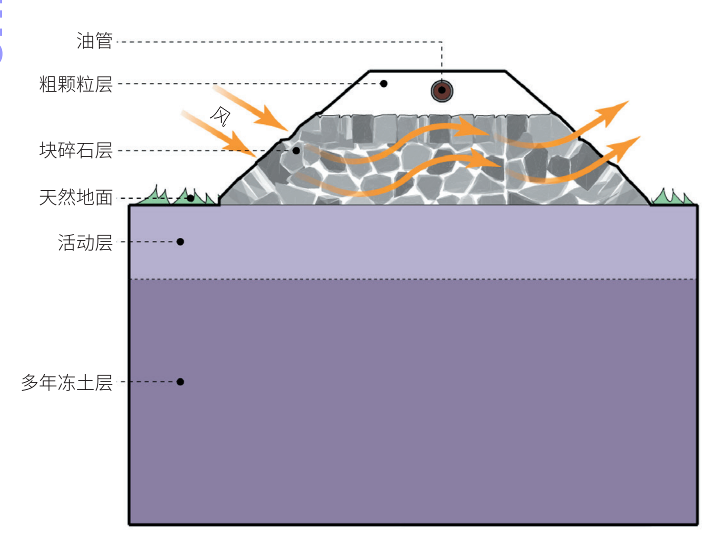


图7　块碎石管堤结构示意图

Figure 7　Schematic diagram of air convective pipeline embankment

（2）研发冻融次生灾害防控新措施。在冻土融沉灾害防控技术研发、优化和推广应用的基础上，加大对管道沿线次生、冷生灾害（如冻胀丘、冰椎和河冰等）防控措施研发力度，形成覆盖整个管道沿线的冻融灾害防控体系。

（3）关注油温持续升高引起的工程和环境问题。俄罗斯的输油温度不断升高，远超过设计温度，必须针对高油温对管道安全和冻土环境的影响及防控对策进行进一步深入研究。

（4）管道走廊多因素系统性研究。中俄原油管道位于大兴安岭工程走廊内，沿线分布有加漠公路和铁路等其他工程。受到气候变化和生态环境的影响和制约，冻土的热状态、工程走廊的热力稳定性是多因素相互作用的结果，未来应重点关注“气候变化-工程走廊-冻土-环境”系统研究。

参考文献

1 Jin H J. Design and construction of a large-diameter crude oil pipeline in Northeastern China: A special issue on permafrost pipeline. Cold Regions Science and Technology, 2010, 64(3): 209-212.

2 Jin H J, Hao J Q, Chang X L, et al. Zonation and assessment of frozen-ground conditions for engineering geology along the China-Russia Crude Oil Pipeline route from Mo’he to Daqing, Northeastern China. Cold Regions Science and Technology, 2010, 64(3): 213-225.

3 李国玉, 金会军, 盛煜, 等. 中国-俄罗斯原油管道工程（漠河—大庆段）冻土工程地质考察与研究进展. 冰川冻土, 2008, 30(1): 170-175.

4 李国玉, 马巍, 王学力, 等. 中俄原油管道漠大线运营后面临一些冻害问题及防治措施建议. 岩土力学, 2015, 36(10): 2963-2973.

5 秦大河, Thomas S. IPCC第五次评估报告第一工作组报告的亮点结论. 气候变化研究进展, 2014, 10(1): 1-6.

6 秦大河. 气候变化科学与人类可持续发展. 地理科学进展, 2014, 33(7): 874-883.

7 吕兰芝, 金会军, 常晓丽, 等. 中俄原油管道工程（漠河—大庆段）沿线气温、地表和浅层地温年际变化特征. 冰川冻土, 2010, 32(4): 794-802.

8 Zhang Z Q, Hou M T, Wu Q B, et al. Historical changes in the depth of seasonal freezing of “Xing’anling-Baikal” permafrost in China. Regional Environmental Change, 2019, 19(2): 451-460.

9 魏智, 金会军, 张建明, 等. 气候变化条件下东北地区多年冻土变化预测. 中国科学： 地球科学, 2011, 41(1): 74-84.

10 Zhang Z Q, Wu Q B, Xun X Y, et al. Climate change and the distribution of frozen soil in 1980–2010 in northern northeast China. Quaternary International, 2018, 467: 230-241.

11 Jin H, Yu Q, Lü L, et al., 2007. Degradation of permafrost in the Xing’anling Mountains, Northeastern China. Permafrost and Periglacial Processes, 2007, 18(2): 245-258.

12 Liguori A, Maple J A, Heuer C E. The design and construction of the Alyeska Pipeline// Third International Conference on Permafrost. Edmonton: National Research Council of Canada, 1978: 151.

13 Serban M, Li G Y, Serban R D, et al. Characteristics of the active-layer under the China-Russia Crude Oil pipeline. Journal of Mountain Science, 2021, https://doi.org/10.1007/s11629-020-6240-y.

14 Wang F, Li G Y, Ma W, et al. Pipeline–permafrost interaction monitoring system along the China–Russia crude oil pipeline. Engineering Geology, 2019, 254: 113-125.

15 李国玉, 马巍, 周志伟, 等. 寒区输油管道基于应变设计的极限状态研究. 冰川冻土， 2016, 38 (4): 1099 -1105.

16 Burgess M. Norman Wells pipeline settlement and uplift movements. Canadian Geotechnical Journal, 1999, 36(1): 119-135.

17 杨思忠, 金会军, 吉延峻, 等. 寒区线性工程沿线冻土区的植被恢复. 冰川冻土, 2008, 30(5): 875-882.

18 吴青柏, 沈永平, 施斌. 青藏高原冻土及水热过程与寒区生态环境的关系. 冰川冻土, 2003, 25(3): 250-255.

19 Wang F, Li G Y, Ma W, et al. Permafrost thawing along the China-Russia Crude Oil Pipeline and countermeasures: A case study in Jiagedaqi, Northeast China. Cold Regions Science and Technology, 2018, 155: 308-313.

20 王永平. 中俄原油管道多年冻土区管基土的冻融灾害及其防治技术研究. 北京: 中国科学院大学, 2016.

21 李国玉， 曹亚鹏， 王俊峰， 等. 一种多年冻土区保护埋设对象的冷垫系统: 中国, 210127470. 2020-03-06.

22 宋正民. 中俄原油管道周围冻土热状况演化规律及块石管堤应用研究. 兰州: 兰州理工大学, 2020.

Permafrost Engineering Problem Along China-Russia Crude Oil Pipeline and Mitigative Measure

LI Guoyu[1,2,3] CAO Yapeng[1,2,3*] MA Wei[1,2,3] JIN Xiaoying[4] CHEN Pengchao[5] YU Qihao[1,2] ZHANG Zhongqiong[1,2,3]
MU Yanhu[1,2,3] JIN Huijun[1,3,4]

（1 State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;
2 School of Engineering Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3 Daxing'anling Observation and Research Station of Frozen-Ground Engineering and Environment, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Jiagedaqi 165000, China;
4 School of Civil Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China;
5 PipeChina North Pipeline Company, Langfang 065000, China）

Abstract The China-Russia Crude Oil Pipeline (CRCOP), one of the four key national energy strategic channels, plays an important role in ensuring national energy security, diversifying oil supplies and transportation patterns, promoting the China-Mongolia-Russian economic corridor, and deepening Sino-Russian strategic cooperation. Aiming at permafrost engineering problems along the CRCOP, the principles of thaw control are put forward. This study develops a set of innovative techniques for mitigating and controlling the thaw of permafrost foundation soils of the pipeline, which provides an important guarantee for the green construction and safe operation of the CRCOP and can protect the permafrost environment along the pipeline route. The research results can offer important references and basis for design, construction, and maintenance of the similar projects in permafrost regions.

Keywords China-Russia Crude Oil Pipeline (CRCOP), permafrost engineering problems, thaw settlement, controlling thawing



李国玉 中国科学院西北生态环境资源研究院研究员。第九届国际冰冻圈科学协会中国委员会执行副秘书长，国际土力学与岩土工程学会会员，中国冰冻圈科学学会理事，中国岩石力学与工程学会地面岩石工程专业委员会委员。主持或参加国家自然科学基金、第二次青藏高原综合科学考察研究、中国科学院战略性先导科技专项等研究项目。主要从事冻土工程与环境及冻融灾害相关的科研工作。E-mail: guoyuli@lzb.ac.cn

LI Guoyu Professor of Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences (CAS). He is Deputy Secretary-General of Chinese National Committee for the International Union of Geodesy and Geophysics, Member of the International Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering, Member of the Chinese Society of Cryosphere Science, and Member of the Surface Rock Engineering Committee of Chinese Society of Rock Mechanics and Engineering. He is hosting a number of major research projects, sponsored by the National Natural Science Foundation of China, the China's Second Tibetan Plateau Scientific Expedition and Research, and the Strategic Priority Research Program of CAS. He has research interests on problems of permafrost engineering and environment, and freeze-thaw disaster. E-mail: guoyuli@lzb.ac.cn

*Corresponding author



曹亚鹏　中国科学院西北生态环境资源研究院在读博士研究生。参与国家自然科学基金、中国科学院战略性先导科技专项（A类）等研究项目。主要从事冻土工程相关的科研工作。E-mail: caoyapeng@lzb.ac.cn

CAO Yapeng　Ph.D. candidate at the Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences (CAS). He is participating in a number of major research projects, sponsored by the National Natural Science Foundation of China and the Strategic Priority Research Program of CAS. He has research interests on problems of permafrost engineering and environment. E-mail: caoyapeng@lzb.ac.cn

■责任编辑：张勇